

## 양생조건에 따른 생석회 혼합토의 공학적 특성

### Engineering Characteristics of Soil-Lime or Cement Mixtures on the Curing Conditions

민덕기<sup>1)</sup>, Tuk-Ki Min, 황광모<sup>2)</sup>, Kwang-Mo Hwang, 이완진<sup>3)</sup>, Wan-Jin Lee 최영철<sup>4)</sup>, Young-Chul Choi

- <sup>1)</sup> 울산대학교 지구환경시스템공학부 교수, Professor, Dept. of GeoEnvironmental Engineering, Univ. of Ulsan.  
<sup>2)</sup> 경북전문대학 건설환경과 전임강사, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, KyungBuk College.  
<sup>3)</sup> 울산대학교 지구환경시스템공학부 박사과정, Graduate Student, Dept. of GeoEnvironmental Engineering, Univ. of Ulsan.  
<sup>4)</sup> 울산대학교 지구환경시스템공학부 석사과정, Graduate Student, Dept. of GeoEnvironmental Engineering, Univ. of Ulsan.

**SYNOPSIS** : To estimate the effects of lime and cement on the surplus soil, the engineering properties of the marine deposited clay and the fresh water clay were analyzed. The specimen were prepared under several curing conditions, namely, underwater curing, wet condition curing and underwater curing after heating. Unconfined compression strength were estimated after 7, 14, 28 and 60 days, respectively. The strength were steeply increased with time until first 14 days. Specially the increase of the strength of the heated soil were large.

**Key words** : surplus soil, marine deposited clay, lime, cement, strength increase ratio.

## 1. 서 론

해안에 인접한 지역과 강 하구 델타 퇴적지역에서 주거용 및 공업용 부지 개발에 따라 연약 해성 퇴적점토의 전단강도 및 압축특성을 개선하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. Manuel Mateos(1964)는 흙-생석회 안정화에 영향을 미치는 요소에 대하여 1947년~1963년에 걸쳐 동결, 융해와 건설에 대한 저항성 연구와 함께 흙의 소성성, 수축성, 강도와 팽창특성에 대한 생석회의 효과에 대하여 연구하였다. 이 연구에서 생석회는 콘크리트의 형성과 유사한 실트질 흙과 점토질 흙의 시멘트결합에도 사용될 수 있는데, cementation에 필요한 생석회의 범위는 2%~8%임을 보고하였다. Majed M. Abu-Zreig 등 (2001)은 점성토의 거동에서 건조처리의 영향을 연구하였는데, 세 가지 시료를 각각 100°C, 200°C, 300°C, 400°C에서 건조한 후 Atterberg 한계시험, 입도분석, 다짐시험, 팽창성 및 일축압축강도시험을 실시하였다. 연구결과에 따르면, 100°C 이상 온도가 상승할수록 액성한계 및 소성한계, 최적 함수비, 팽창성이 감소하였으며, 최대건조단위중량은 약간 증가하는 것으로 나타났다.

국내의 석회 안정처리에 관한 연구는 토질에 따른 석회혼합비율과 양생일수에 따른 강도특성, C.B.R의 변화 및 연경도의 변화를 이용하여 도로기층, 보조기층 및 노상층 등에 활용하기 위한 연구가 수행

되었으며(전몽각, 1975; 정두영 등, 1986), 유우수 등(1986)은 보조기층재료로써 흙의 석회 안정처리에 대한 실험적 연구에서 점토질 흙에서 석회의 최적 함량치는 7%~14% 사이에 존재하고 있음을 밝힌바 있다.

본 연구에서는 울산광역시 남구 달동, 삼산동 지역에서 넓고 두껍게 분포하고 있는 해성 퇴적점토와 육성점토를 사용하였으며, 민덕기 등(1999)의 흙-생석회 안정화에 대한 시험적 연구에서 생석회 함량비가 10%이상에서 강도가 크게 증가되는 것으로 나타나 생석회 및 시멘트 첨가재의 혼합비를 10%로 고정하여 각종 지반 공학적 시험을 수행하였다. 시료토와 첨가재의 혼합에 따른 지반 공학적 성질 변화를 예측하기 위하여 수중, 습윤 및 heating 후 수중 양생조건으로 7일, 14일, 28일, 60일 양생하여 일축압축 강도시험을 실시하고, 양생조건 및 양생기간에 따른 영향을 분석하였다. 또한, 양생조건에 따른 함수비 저감효과와 혼합토의 양생에 따른 강도증진효과를 주사전자현미경(SEM) 관찰을 통하여 정성적으로 분석코자 하였다. 본 연구를 통하여 연약지반을 굴착할 경우, 다량 발생하는 점성토의 함수비 저감 및 강도개선효과를 예측할 수 있으며, 현장조건에 적합한 혼합토의 양생조건 및 양생기간을 선정할 수 있을 것이다.

## 2. 생석회 및 첨가재에 의한 강도발현

많은 연구결과에서 밝혀진 생석회 및 시멘트 첨가재에 의한 안정화 과정의 반응으로는 (1)양이온 교환(cation exchange)(Diamon, Kinter 1965), (2)응집(flocculation) 및 aggregation(Herzog, Mitchell 1963), (3)생석회의 탄산화반응(lime carbonation)(Eades 등 1962, Le Roux 1969, Pretty와 Rich 1971) 그리고 (4)생석회와 규산염, 알루미늄 사이의 포졸란반응(pozzolanic reaction)이 있다. Manuel Mateos(1964)는 그의 연구에서 생석회는 흙의 공학적 특성을 개선하는데 성공적으로 사용될 수 있는 제품 중의 하나이며, soil-lime-water system에 영향을 미치는 첫째 요소로는 흙의 입도 분포상태(soil gradation), 흙 내부에 존재하는 점토광물(clay minerals)의 종류 그리고 유기물질(organic materials) 등, 생석회의 종류와 첨가량, 흙에 첨가되는 다른 화학적 첨가제(chemical additions)가 있는 것으로 보고하였다. 또한, 함수비, 생석회의 적용상태(분말상태, 슬러리상태), 양생온도와 양생기간이 중요한 요소임을 밝힌 바 있다. 흙과 시멘트, 흙과 아스팔트계 안정처리는 점토함량에 제한을 받는 반면, 석회안정처리에서는 점토광물의 종류 및 함량이 역학적 성질을 개선하는데 중요한 인자로 작용한다. 점토입자 속에 존재하는 점토광물-물-공기(이산화탄소)에 생석회가 첨가되면, 이온교환반응과 포졸란반응이 일어나게 된다. 이로 인하여 단기 및 장기에 걸쳐 반응 생성물이 생성되며, 이 반응 생성물이 흙의 공학적 성질을 개선하게 되는 중요한 인자이다. 흙-석회반응을 정성적으로 간단히 살펴보면 다음과 같다.

- ①  $Ca[OH]_2 \rightarrow Ca^{++} + 2[OH]^-$
- ②  $Ca^{++} + 2[OH]^- + SiO_2(\text{clay silica}) \rightarrow CSH$
- ③  $Ca^{++} + 2[OH]^- + Al_2O_3(\text{clay alumina}) \rightarrow CAH$

## 3. 실내시험

### 3.1 대상토의 물리, 화학적 특성

본 연구를 위하여 울산광역시 남구 삼산지역의 지표 하 6m지점과 동구 화정동의 지표 하 4m에서 각각 해성 퇴적점토와 육성점토를 채취하였으며, 각 대표시료에 대한 물리적 성질은 표 3.1과 같다.

표 3.1 대상토의 물리적 특성

항 목 대상토	Atterberg Limits(%)			자 연 함수비 (%)	Gs	pH	#200체 통과율 (%)	유기물 함유량 (%)	염 분 함유량 (%)	흙의 분류 (USCS)
	$w_L$	$w_P$	$I_P$							
해 성 토	56.19	29.68	26.51	60.3~76.5	2.64	4.59	91.36	8.67	0.72	CH-OH
육 성 토	37.50	20.40	17.10	26.38	2.75	4.82	97.88	7.49	0.0121	CL

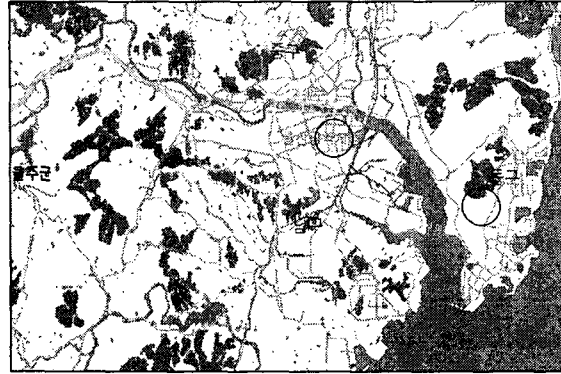


그림 3.1: 시료채취 위치도

### 3.2 대상토 및 생석회의 구성성분

대상토와 생석회의 구성성분을 분석하고자 X-선 형광분석(X-Ray Fluorescence, XRF)을 실시한 결과, SiO<sub>2</sub>가 각각 68.48%, 67.58%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 각각 15.75%, 19.6%로 전체의 84.23%와 87.18%를 차지하여 포졸란재료의 혼합으로 포졸란 반응에 유효한 흙으로 판단되었다. 또한, 본 연구에 사용된 생석회는 단양산으로 CaO 함유량이 93%로 1호에 속하며, 비중 3.03, No.200체 통과백분율이 92%로 나타났다.

표 3.2 대상토 및 첨가재의 구성성분

구성비(%)

구성원소 대상토	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MnO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
해 성 토	68.48	15.75	5.12	1.84	0.07	1.99	2.66	3.36
육 성 토	67.58	19.60	6.21	0.54	0.09	1.16	2.75	0.16
생 석 회	6.08	1.53	0.54	92.97	0.03	0.5	0.14	0.17

### 3.3 시험조건

본 연구에서는 해성 퇴적토에 생석회 및 시멘트를 첨가한 후 재령에 따른 압축강도발현에 대하여 평가하였으며, 양생조건(수중양생, 습윤양생, heating 후 수중양생)에 따른 강도를 측정함으로써 양생조건에 따른 강도증진효과를 검토하였다. 표 3.3에 일축압축시험의 조건을 나타내었다. 다짐방법은 정적다짐으로 공시체 몰드는 직경 5.0cm, 높이 10.0cm이다. 지반 안정화처리를 위한 실내시험의 경우, 재령에 따른 강도발현 특성에 관한 연구를 위하여 양생일(7일, 14일, 28일, 60일)에 따른 일축압축시험을 수행하였다.

표 3.3 시험조건

시험종류	일축압축시험	시험종류	일축압축시험
첨가제 첨가율	생석회 10% 시멘트 10%	양생조건	수중양생, 습윤양생
			100℃ heating(1hr, 2hr) 후 수중양생
공시체 제작방법	정적다짐 및 동적다짐	양생기간	7일, 14일, 28일, 60일

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 함수비 저감효과

본 연구에 사용된 해성 퇴적점토는 자연상태에서 고 함수상태로 존재하므로 해성 퇴적토의 유효이용을 위해서는 함수비를 저감시키는 것이 효과적이다. 따라서, 자연상태 해성 퇴적토 조건에 생석회 및 시멘트를 각각 10%를 혼합하여 양생기간의 경과에 따른 함수비 저감을  $w_d(\%)$ 을 구할 수 있다. 함수비 저감율은 해성 퇴적점토의 함수량이 생석회 및 시멘트의 소화반응에 의해 대부분 저감되는 것으로 보고되고 있다.

$$w_d = \frac{\text{저감된 함수량}(\%)}{\text{공시체 제작에 사용된 함수량}(\%)} \times 100(\%) \quad (\text{식 4.1})$$

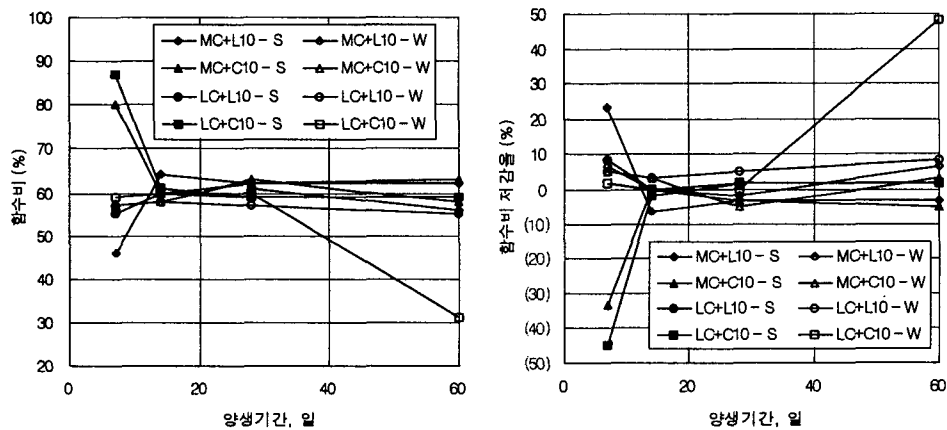


그림 4.1 양생기간에 따른 혼합토의 함수비 변화 및 함수비 저감율

그림 4.1에서 보는바와 같이, 양생 14일부터는 대부분의 혼합토의 함수비가 혼합 함수비에 근접하는 것으로 나타났다. 또한, 함수비 저감율은 생석회 혼합토가 초기 양생조건에서 효과적인 것으로 나타났으며, 수중 양생조건보다 습윤 양생조건에서 함수비 저감량이 증가되는 것으로 나타났다.

### 4.2 양생기간에 따른 흙의 연경도 특성

한국공업규격(KS F 2301)에 의하면, 토질시험에 사용할 시료는 각 토질시험방법 및 흙의 종류에 따라 비건조법, 공기건조법, 노건조법 중 1가지 방법을 사용한다고 규정하고 있다. 그러나, 현장에서 채취한

습윤상태의 시료와 공기 중에서 건조한 시료의 물리적 성질은 다소 차이가 있음을 보고하였다(민덕기 등, 2000). 따라서, 본 연구에서는 양생조건과 양생기간에 따른 연경도의 변화를 분석코자 하였다. 습윤 시료의 경우 소성지수의 변화에 있어 뚜렷한 경향은 보이지 않았으며, 수중 양생의 경우, 양생기간이 증가할수록 소성지수가 감소하는 것으로 나타났다. 시험결과는 표 4.1과 같다.

표 4.1 수중 양생시료의 양생기간에 따른 연경도 변화

구 분	액성한계, $w_L$ (%)		소성한계, $w_P$ (%)		소성지수, $I_P$ (%)	
	28일	60일	28일	60일	28일	60일
MC+L10%-수중	59.34	52.43	37.14	33.17	22.20	19.26
MC+C10%-수중	65.16	57.93	45.28	39.56	19.88	18.37
LC+L10%-수중	54.89	49.53	37.27	39.39	17.62	10.14
LC+C10%-수중	54.33	59.01	39.82	44.06	14.51	14.95

### 4.3 수중 및 습윤 양생시 강도증가 특성

생석회와 시멘트를 혼합한 시료토로 공시체를 제작하고, 각각 수중 양생 및 습윤 양생을 실시하여 양생기간(7일, 14일, 28일, 60일)에 따른 일축압축강도의 변화를 분석하여 그 결과를 그림 4.2에 나타내었다. 그림 4.2에서 보는바와 같이, 습윤 양생조건인 시멘트 혼합토는 재령 14일까지 급격한 강도증가 특성을 보였으며, 생석회 혼합토의 경우는 재령 14일이 지난 후에도 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 습윤 양생조건에서 생석회 혼합토강도에 대한 시멘트 혼합토의 강도비는 재령 60일에서 4.08~4.27로 나타났다. 수중 양생조건에서 시멘트 및 생석회 혼합토는 재령 14일 이후에도 강도증가 효과가 있는 것으로 나타났으며, 생석회 혼합토강도에 대한 시멘트 혼합토의 강도비는 재령 60일에서 3.65~6.12로 나타났다. 두 양생조건에서 시멘트의 강도 증가비를 분석한 결과, 수중 양생조건에서는 해성 퇴적점토의 강도증가가 뚜렷하게 나타났으며, 습윤 양생조건에서는 육성 점토의 강도증가가 약간 크게 나타났다. 또한, 생석회 혼합토의 강도는 해성 퇴적점토에서는 습윤 양생조건에서, 육성 점토에서는 수중 양생조건에서 강도증가가 큰 것으로 나타났다.

### 4.4 heating에 따른 강도증진 효과

Manuel Mateos(1964)는 흙-생석회 안정화의 영향요소에 대한 연구에서 흙의 종류와 생석회 첨가량에 따라 차이는 있으나, 증기 양생시 상당한 강도가 증가됨을 밝혔다. 그의 연구결과에 따르면, 흙-생석회 안정화 시료에 대한 증기양생(250°F)의 경우 매우 높은 강도를 보다 짧은 시간에 발현되었음을 보고하였다. Majed M. Abu-Zreig 등(2001)은 점성토의 거동에서 건조처리의 영향을 연구하였다. 그의 연구결과에서, 일반적으로 100°C보다 낮은 온도에서는 물리적 특성에 미치는 영향은 크지 않으며, 상대적인 물리적 특성의 변화가 100°C~300°C범위에서 크게 발생하였다. 따라서, 본 연구에서는 물리적 특성의 변화가 없는 100°C 건조로에서 대상토에 heating을 실시한 시료토를 준비하였다. 이 시료토에 생석회 및 시멘트를 각각 10% 첨가하여 수중 양생조건으로 양생을 실시하였으며, 양생기간에 따른 강도증가 특성을 분석하여 그 결과를 그림 4.3, 그림 4.4, 그림 4.5에 나타내었다. 그림 4.4는 100°C 건조로에서 1시간, 2시간 heating한 시료토로 생석회와 시멘트를 혼합한 후 수중 양생한 공시체의 강도증가를 나타낸 것이다. 그림 4.5는 자연시료에 대한 heating 시료의 강도증가를 보여주고 있다. 그림 4.5에 나타난바와 같이, 최소 1배에서 최대 3배의 강도증가를 재령 14일 이내에 발현하는 것으로 나타났으며, 점차 그 증가가 일정 또는 감소하는 것으로 나타났다.

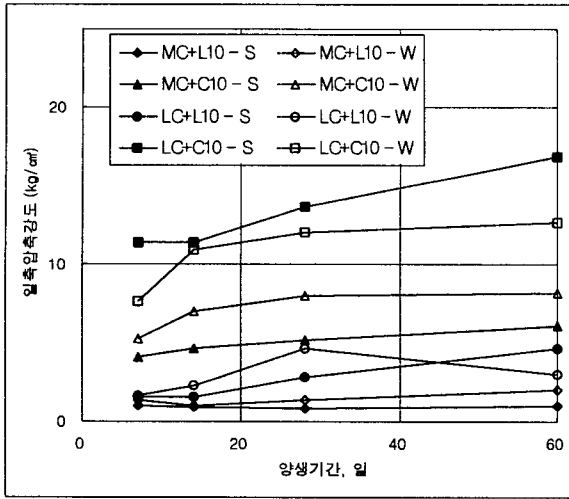


그림 4.2 재령에 따른 강도변화  
(수중양생, 습윤양생)

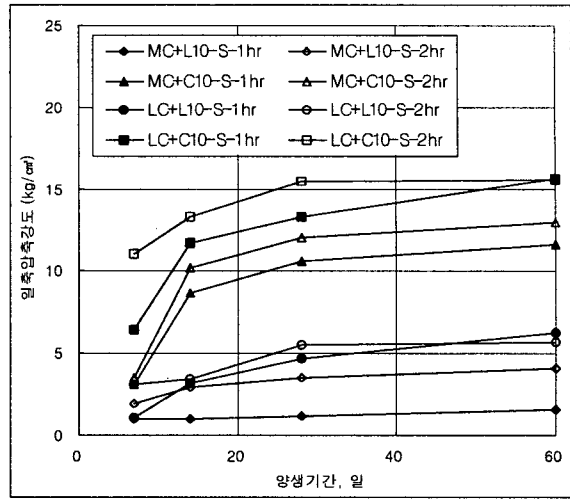
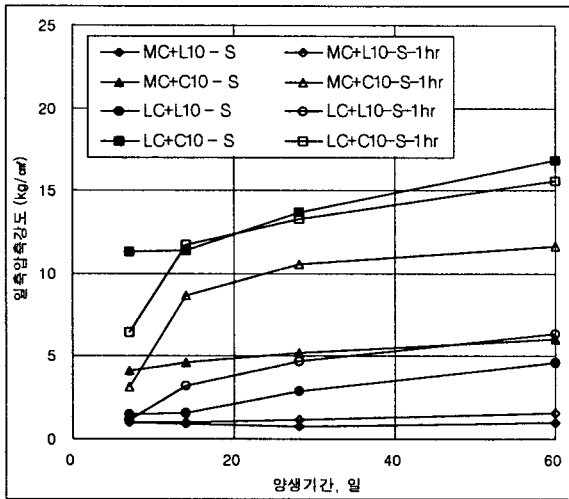
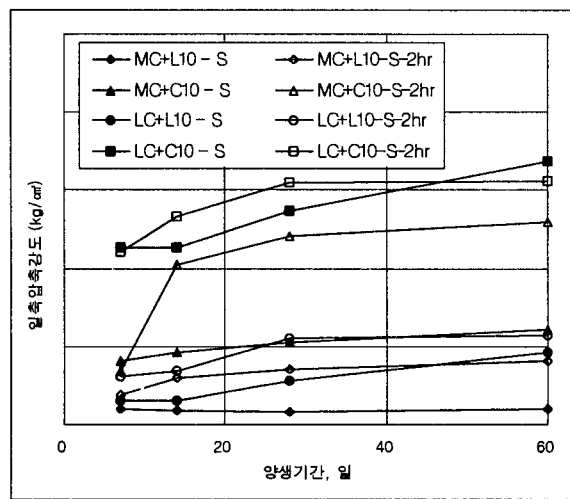


그림 4.3 재령에 따른 강도변화  
(heating 후 수중양생)

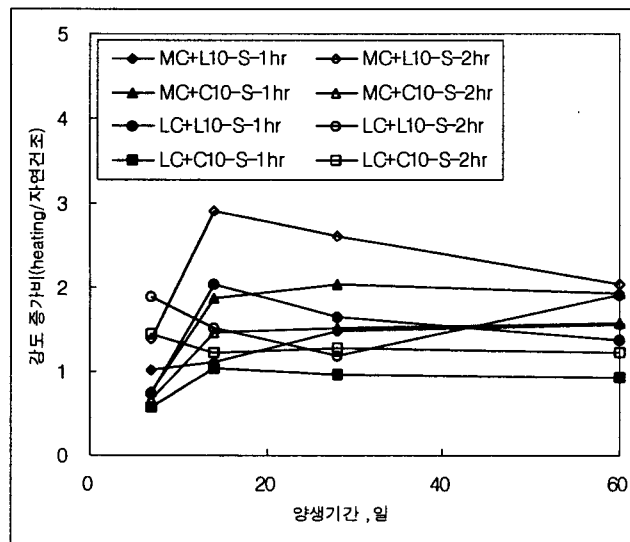


(a) 1시간 heating



(b) 2시간 heating

그림 4.4 자연 건조시료와 heating 시료의 강도비교



#### 4.5 주사 전자 현미경 관찰

주사 전자 현미경(scanning electron microscope, SEM)의 특징은 비교적 큰 표본을 입체적으로 관찰할 수 있으며, 각각의 camera system을 통하여 관찰 즉시 촬영을 할 수 있다.

본 연구에서는 원시료토인 해성 퇴적점토와 육성점토에 생석회 및 시멘트를 10%첨가한 후 60일 수중양생 및 습윤 양생을 실시한 후 일축압축강도시험을 실시하였다. 또한, 혼합토의 강도증가 특성을 정성적으로 분석코자 주사 전자 현미경을 이용하여 포졸란 반응생성물을 관찰하였다. 그림 4.7(a)에서 보는 바와 같이, 원시료토는 다량의 유기물을 함유하고 있었다. 그림 4.7(b), (c), (d), (e)에서 보는바와 같이, 양생기간이 60일을 경과한 후에 혼합 처리된 시료토에서 입자간 응집현상·면모현상을 관찰할 수 있다. 그 원인으로는 생석회의 수화반응에 의해 생성된 소석회가 간극수에서 분해가 발생하여 칼슘 2가 이온과 수산기 이온으로 분해되고, 칼슘이온은 양이온교환이 발생하게 되어 면모화나 응집현상을 발생시킨 결과로 판단된다.

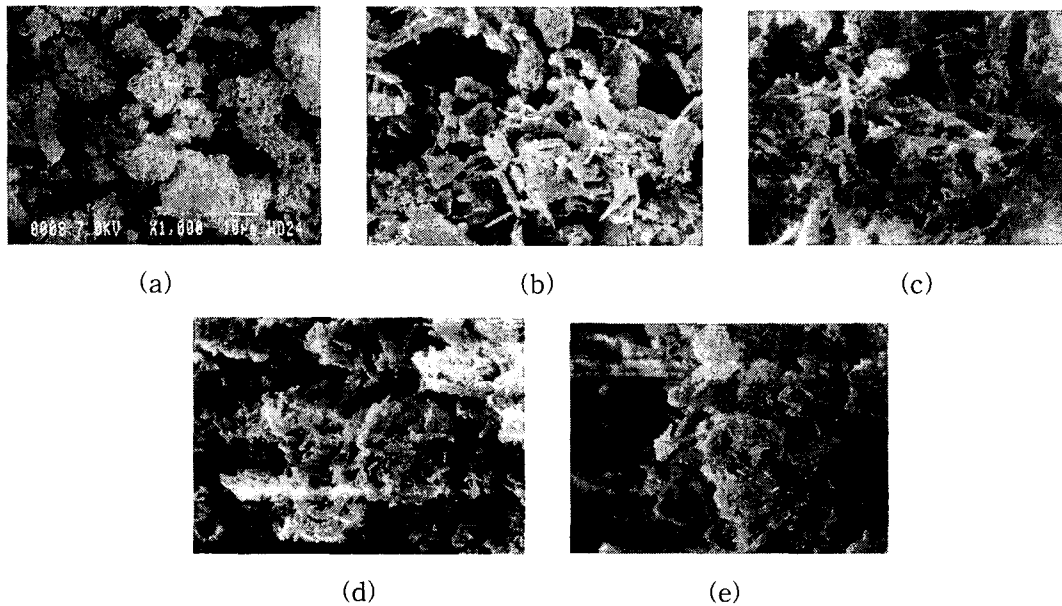


그림 4.7 혼합토의 주사 전자 현미경(SEM) 관찰

- (a) 해성 퇴적점토의 주사 전자 현미경 관찰
- (b) MC+L10(60일 수중양생) (c) MC+C10(60일 수중양생)
- (d) MC+L10(60일 습윤양생) (e) MC+C10(60일 습윤양생)

#### 5. 결론

본 연구에서 혼합토의 강도개선 특성을 분석코자 울산지역의 2개소에서 해성 퇴적점토와 육성점토를 채취하여 강도개선을 위한 시료토의 적합성을 분석하였다. 또한, 이 시료토에 생석회 및 시멘트를 10% 첨가하여 양생조건과 양생기간에 따른 함수비 저감효과 및 강도증가 특성을 비교·분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 양생기간에 따른 혼합토의 연경도 특성을 분석한 결과, 수중 양생에서 양생기간이 증가할수록 소성지

수가 감소하는 것으로 나타났다.

2. 양생조건에 따른 강도증가 특성에서 혼합토는 재령 14일까지 급격한 강도증가 특성을 보였다. 또한, 생석회 혼합토에 대한 시멘트 혼합토의 강도증가비가 재령 60일에서 습윤 양생조건에서 4.08~4.27, 수중 양생조건에서 3.65~6.12로 나타나 시멘트 혼합토의 경우 조기강도발현에 유효할 것으로 나타났다.
3. 대상토의 heating에 대한 영향을 분석한 결과, 전체 혼합토에서 1배~3배의 강도증가가 재령 14일 이내에 발생됨을 확인할 수 있었다.

따라서, 현장에서 발생하는 굴착잔토의 유효사용을 목적으로 각종 첨가재를 사용할 경우, 조기강도에는 시멘트를 첨가하는 경우가 유효하며, 고함수비의 해성 퇴적점토에 대한 장기강도발현에는 생석회 및 시멘트의 첨가가 유효한 것으로 판단된다. 아울러, 고함수비의 해성 퇴적토를 증기 및 건조로에 통과시킴으로써 함수비 저감 및 연경도 특성의 변화를 꾀하고, 유기물질의 제거, aggregation형성에 유효할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 도덕현, 이재현.(1978. 6), “도로기층 안정처리에 관한 실험연구(1)”, 한국토목학회 논문집 제26권 2호, pp.73~84.
2. 민덕기, 황광모, 강문기.(2000. 12), “울산 퇴적 점토의 화학적, 광물학적 특성”, 한국지반공학학회논문집 제16권 6호, pp.51~58.
3. 민덕기, 황광모, 박근호.(2001. 8), “석회 및 화학첨가제에 의한 건설잔토의 안정처리”, 한국지반공학학회 논문집 제17권 4호, pp.143~149.
4. 전몽각.(1975. 9), “석회에 의한 토질안정처리”, 대한토목학회지 제23권 3호, pp.61~66.
5. 정두영, 최길렬, 이병석.(1986. 12), “Ca, Al계 안정처리토의 구조적 특성 비교”, 대한 토질공학회 제2권 3호, pp.1~5.
6. 황진연, 김병규.(1999.3), “점토와 석회의 혼합에 의한 반응생성물과 물성변화”, KGS Spring '99 National Conference, pp.505~512.
7. 鬼塚克忠, 南里 勝.(1996), “生石灰とホソラン材料添加による建設發生土(有明粘土)の強度發現特性”, 日本 土木學會論文集 No.547/III-36, pp.97~106.
8. James K. Mitchell.(1992), Fundamentals of Soil Behavior-2nd Edition, John Wiley and Sons, New York, pp84~99, pp.131~159.
9. Kacques Locat, Marc-Andre Berube, Marc Choquette.(1990), “Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development”, Can. Geotechnical Journal Vol. 27, pp.294~304.
10. Manuel Mateos.(1964), “Soil Lime Research at Iowa State University”, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE Vol. 90, No. SM2, pp.127~153.
11. Majed M. Abu-Zreig, Nabil M. Al-Akhras, Mousa F. Attom.(2001), “Influence of heat treatment on the behavior of clayey soils”, Applied Clay Science 20, pp.129~135.
12. Masashi Kamon, T. Katsumi.(1994), “ Utilization of Waste Slurry from Construction Works”, 8th ICSMFE New Delhi, India, pp.1613~1616.
13. National Lime Association.(1987), “Lime Stabilization Construction Manual”, 9th Edition, pp.1~46.
14. S. Narasimha Rao, G. Rajasekaran.(1996. 5), “Reaction Products Formed in Lime-Stabilized Marine Clays”, Journal of Geotechnical Engineering Vol. 122 No.5, pp.329~336.